

The evaluation of exposure risks to non-ionizing electromagnetic radiations: prediction, measurement and mapping modeling for the city of Natal

A avaliação dos riscos de exposição a radiações eletromagnéticas não ionizantes: modelagem de previsão, medição e mapeamento para a cidade de Natal

Recebimento dos originais: 05/02/2019

Aceitação para publicação: 07/03/2019

Fred Sizenando Rossiter Pinheiro

Doutor em Ciências da Saúde pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Endereço: Rua Pastor Jerônimo Gueiros 1265, CEP 59.020-660. Apt. 301, Bairro Tirol
Natal- RN, Brasil

E-mail: fredrossiter@uol.com.br

Gutembergue Soares da Silva

Doutor em Engenharia Elétrica e Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Endereço: Rua Miguel Barra 800, CEP 59.014-590. Apt. 1200, Bairro Tirol, Natal- RN, Brasil

E-mail: guttembbergue@gmail.com.br

André Pedro Fernandes Neto

Doutor em Ciências da Computação e Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Instituição: Universidade Federal Rural do Semi-árido, Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.

Endereço: Rua João da Escócia 1727, CEP 59607-339. Rua Praia de Pitanga 266, Bairro Nova Betânia, Mossoró-RN, Brasil

Email: andrepedro@ufersa.edu.br

RESUMO

O aumento maciço das comunicações sem fio no mundo exige ações responsáveis pelos governos para evitar possíveis riscos para a saúde. Além da alta concentração de torres celulares em áreas urbanas, também é importante considerar outras radiações de radiofrequência de diferentes fontes. A intensidade do campo elétrico é um dos parâmetros fundamentais para avaliar a exposição dos seres humanos à radiação não ionizante (RNI). Todas as principais fontes de radiação não ionizantes na área urbana de Natal, Brasil foram localizadas e caracterizadas em relação as faixas de frequência, serviço de telecomunicações e a intensidade de campo elétrico integrada. Medições de intensidade de campo elétrico distante com frequência variando de 30 MHz a 3 GHz foram feitas em uma pesquisa de 160 pontos outdoor espalhados por toda a área de 167,26 km² da cidade. Os resultados obtidos permitiram realizar um mapeamento da cidade identificando por região, as diferentes

intensidades de campo elétrico e relação de exposição (ER). Em 71,4% dos pontos onde foram feitas medições, o maior índice de exposição verificado decorreu de serviços de transmissão de TV, 22,1% das transmissões torres celulares e 6,4% de rádio difusão com modulação em frequência.

Palavras Chave: Comunicações Sem Fio, Exposição à Radiação Não Ionizante, Medição de Radiação de Rádio Frequência, Análise Multivariada.

ABSTRACT

The massive increase in communications without the risk of changing requirements for security. In addition to the high concentration of cellular towers in urban areas, it is also important to consider other radiofrequency radiations from different sources. The intensity of the field is one of the fundamental factors to evaluate the reality of non-ionizing radiation (RNI). All sources of non-ionizing radiation in the urban area of Natal, Brazil were the characteristics of the frequency frequencies, the wireless service and the intensity of the integrated system. Measurements of sound intensity along the route ranging from 30MHz to 3GHz were made in a survey of 160 points scattered throughout the 167.26 km² area of the city. The results obtained allow the verification of the mapping of the city by region, as different field intensities and exposure ratio (ER). In 71.4% of the points the measurements were included, the highest exposure index was from TV transmission services, 22.1% from cell tower transmissions and 6.4% from radio with frequency frequency modulation.

Keywords: Wireless Communications, Non-Ionizing Radiation Exposure, Radio Frequency Radiation Measurement, Multivariate Analysis.

1 INTRODUÇÃO

As radiações eletromagnéticas são ondas eletromagnéticas, compostas por duas componentes interdependentes – o campo elétrico e o campo magnético – que se propagam no espaço, transportando energia. Dependendo dos comprimentos de onda, podem ser do tipo ionizante ou não ionizante. A radiação não ionizante (RNI) é a radiação na parte do espectro eletromagnético abaixo de 300 GHz onde não há energia suficiente para causar ionização (ANATEL, 2002). Essa faixa do espectro abrange praticamente todos os serviços de radiocomunicação de utilização pública e privada como: TV, Serviço Móvel Celular, Radiodifusão (Rádios AM/FM/ Digital), Transmissão via Satélite e Serviços Multimídia, Wi-Fi, entre outros. Não somente as novas tecnologias que geram campos eletromagnéticos tem evoluído rapidamente, mas os padrões de uso dos dispositivos, também tem mudado. As implementações crescentes dos novos serviços, potencialmente dão origem a novos ambientes de exposição eletromagnética, em decorrência do surgimento de diferentes frequências e níveis de potência, bem como diferentes tempos e áreas de exposição no corpo humano (COST, 2000).

A incerteza científica sobre quais são os reais danos causados pelas radiações não ionizantes, conduziram o Brasil e muitos outros países a adotarem o Princípio do Direito denominado “Princípio da Precaução” (DECLARAÇÃO RIO 92, 1992), a partir do qual medidas legais de prevenção aos efeitos da RNI passaram a ser implementadas. O Princípio de Precaução integra o Princípio 15 da Declaração do Rio (Pinheiro, 2015) e estabelece que "a fim de proteger o meio ambiente, uma abordagem preventiva deve ser amplamente aplicada pelos Estados de acordo com suas capacidades. Onde existem ameaças de dano irreversível ou falta de certeza científica completa, a relação custo-benefício não deve ser usada como uma razão para adiar medidas para prevenir a degradação ambiental ". As normas de proteção ambiental estabelecem limites para emissão de RNI são inspiradas principalmente por documentos emitidos pela Comissão Internacional sobre Proteção contra Radiação Não-ionizante (ICNIRP) e o American National Standards Institute (IEEE/ANSI) (PINHEIRO, 2015). Os limites foram estabelecidos essencialmente com base em efeitos térmicos de campos conhecidos.

O olho humano é um dos órgãos mais suscetíveis ao efeito térmico da RNI, quantidades pequenas de energia eletromagnética podem elevar a temperatura das lentes oculares. Isso decore pelo fato das lentes terem uma posição superficial em relação ao corpo e não possuírem sistema vascular adequado para as trocas térmicas, reduzindo assim sua capacidade de dissipar o calor. Catarata pode ser produzida por repetidas exposições em níveis inferiores aos limites recomendados pelo ICNIRP (Lamparelliet *al.*, 1998). Os efeitos não-térmicos provocados pelas radiações não ionizantes têm sido também objeto de pesquisa. Esses efeitos são, por exemplo, efeitos bioquímicos ou eletro físicos causados diretamente pelos campos eletromagnéticos induzidos, e não indiretamente por um aumento localizado ou distribuído de temperatura. Embora não exista consenso científico, há sugestões de possíveis associações com alterações no eletroencefalograma (Reiser et al., 1995), (Huber et al., 2000); abortamento e má formação fetal (Quelet-Hellstrom, Stewart, 1993), entre outras.

A intensidade da radiação eletromagnética é normalmente medida pela densidade de potência por metro quadrado (W/m^2) ou pela intensidade do campo elétrico (V/m). Os efeitos da absorção de RNI pelo corpo humano sobre os tecidos apresentam características distintas para diferentes frequências de radiação. Cada tecido do corpo humano tem uma Taxa de Absorção Energia diferente. Essa absorção de energia pode ser caracterizada por um parâmetro conhecido como Taxa de Absorção Específica (SAR) (GIOVANI, 2006).

Na prática, existem algumas dificuldades na realização de medidas SAR, sendo a mais relevante a de medir dentro do tecido vivo. Portanto, as medidas de radiação no ar são aceitas alternativamente. Esses níveis serão, em geral, menores dentro do tecido biológico principalmente devido a atenuação da energia de radiofrequência através de vários materiais (Pérez-Vega e Zamanillo, 2005). A SAR (especialmente na cabeça dos usuários celular) podem ser simulados usando métodos matemáticos, por exemplo, o domínio do tempo de diferença finita – FDTD (SALLES *et al.*, 2003). Existe muito debate científico sobre se uma longa exposição à níveis de radiação eletromagnética inferiores aos limites podem causar efeitos prejudiciais à saúde. Muitos projetos de pesquisa estão envolvidos nesta investigação por estudos *in vivo*, *in vitro* e epidemiológicos (FEYCHTING *et al.*, 2005).

No ano de 2010, dez países da América Latina já haviam implementado legislações estabelecendo limites para exposição às radiações não ionizantes: Argentina, Bolívia, Brasil, Colômbia, Chile, Equador, Panamá, Paraguai, Peru e Venezuela (PINHEIRO, 2015). Mesmo com a legislação brasileira estabelecendo limites de exposição à RNI, a população e os órgãos de controle como o TCU têm se mostrado apreensivos e questionam a forma como o monitoramento ambiental referente a poluição eletromagnética estaria sendo executado. Na cidade do Natal, os procedimentos de medições de RNI tem ocorrido de forma pontual, em geral por acionamento da justiça, sempre que algum morador questiona a construção de uma torre celular em área vizinha à sua residência. Além da falta de uma avaliação mais ampla do ponto de vista geográfico, percebe-se a necessidade de aferição mais generalizada das radiações emitidas e não somente as decorrentes dos sistemas celulares. Desta feita, o problema central da pesquisa focaliza a predição, a medição e a análise dos referidos níveis em Natal, considerando os limites de exposição humana à RNI definidos pela ANATEL.

Nesse estudo foi utilizada a técnica de modelagem estatística de regressão multivariada, para desenvolver um conjunto de equações que possibilita a estimativa da Intensidade do Campo Elétrico em qualquer ponto de Natal decorrente do serviço de telecomunicações, identificado as contribuições para a poluição eletromagnética, de modo a elaborar diagnóstico sobre a situação atual da emissão de radiação eletromagnética não ionizante na área urbana cidade, avaliando a variação da Intensidade do Campo Elétrico emitida pelas estações fixas de radiocomunicação nas faixas de 88 MHz a 2.400 MHz em ambientes externos, verificando com base no parâmetro “Razão de Exposição” (RE) se a Intensidade da Radiação está dentro dos limites estabelecidos pela legislação brasileira e das recomendações internacionais do ICNIRP. A pesquisa possibilitou também a identificação

dos serviços de telecomunicações que mais contribuem para poluição eletromagnética na cidade do Natal.

2 REFERENCIAL TEÓRICO E MODELAMENTO

Métodos numéricos e analíticos têm sido desenvolvidos para explicar como ocorre o acoplamento dos campos eletromagnéticos em corpos biológicos. Os principais métodos numéricos usados para avaliar a potência absorvida pelos corpos são: método dos momentos (MoM), Domínio Finito Diferencial No Tempo (FDTD), Técnica de Integração Finita (FIT) e o Método de Relações Finitas (FEM) (LIN JC, BERNARDI P., 2006). Fórmulas empíricas têm sido propostas computacionalmente para modelar as diversas situações. A Taxa de Absorção Específica (SAR) é um importante parâmetro cientificamente estabelecido de aferição da energia eletromagnética absorvida nos corpos. Ela deve ser determinada quando a exposição ocorre à distância de 0,2 metros ou menos a partir da fonte geradora da radiação (campo próximo) (RAPPAPORT, 2008). Embora seja teoricamente a medida que melhor permite avaliar os efeitos da radiação eletromagnética, na prática não há como medi-la em um indivíduo vivo. As técnicas atuais adotadas para estimar a SAR incluem a simulação por computador e medição do campo induzido em maquetes artificiais imitando o corpo humano ou parte dele como a cabeça (para simular os efeitos de uso do celular) (ANGUERA, MDG, 2012). O valor da SAR corresponde a energia absorvida por unidade de massa no tecido exposto à radiação num determinado tempo, normalmente e expressa em watts/Kg. A SAR pode aferir uma média geral do corpo ou uma avaliação localizada, por exemplo para a cabeça, pescoço, tronco e membros. Normalmente as medições da SAR são feitas a partir de 1g ou 10g de tecido. De acordo com o ICINRP, os efeitos da absorção de campos eletromagnéticos no corpo humano apresentam características diferenciadas de acordo com a faixa de frequência de emissão de ondas (ICNIRP, 1998).

A forma utilizada para obter a distribuição de dosimetria da SAR devido ao uso do celular é feita por meio de imagens de ressonância magnética ou de tomografia computadorizada a partir do uso de modelos artificiais (bonecos) de corpos humanos com anatomia e características dielétricas assemelhadas (SALLES *et al.*, 2003). As bases da absorção têm sido obtidas usando modelos canônicos do corpo divididos em camadas e com várias formas. Diversos modelos foram criados em diferentes trabalhos para partes diferentes do corpo e atenção especial tem dada à exposição da RNI em crianças. Em frequências típicas de sistemas de comunicações os principais efeitos da absorção da radiação não

ionizante podem ser divididos em: “térmicos” e “não térmicos”. Os efeitos térmicos são aqueles causados por um aquecimento direto dos tecidos biológicos como resultado da absorção da energia eletromagnética em um meio dissipativo, a exemplo, nos meios dielétricos, onde a permissividade (constante dielétrica) apresenta uma parte imaginária maior que zero (SALLES *et al.*, 2003). A preocupação em relação aos “efeitos não térmicos” da absorção da energia eletromagnética nos seres humanos decorre essencialmente pelas incertezas científicas em relação a esse aspecto. Os efeitos térmicos são bem conhecidos há muitos anos e são considerados nas normas mais difundidas que limitam a exposição aos campos eletromagnéticos não ionizantes (SALLES A., 2000).

2.1 LIMITES À EXPOSIÇÃO DE RNIs

A definição de limites de exposição humana (ICNIRP, 1998) é a principal referência utilizada pela ANATEL (2002) por meio da Resolução Número 303. No âmbito federal a Lei 11.934 (BRASIL, 2009) define distâncias mínimas de pelo menos 50 m de distância das estações de transmissão de rádio para "áreas críticas" (hospitais, escolas, asilos, creches, clínicas). A incidência de RNI sobre um material produz efeitos térmicos e não térmicos. Os efeitos térmicos são consequência do aumento da vibração das moléculas do material causado pela incidência da radiação. Sobre os efeitos não térmicos, atualmente eles são pouco compreendidos e estudados. A ANATEL em sua resolução de número 303, define limites de exposição humana à RNI, baseados nos valores estabelecidos pela ICNIRP. Esta Resolução emitida em 2 de julho de 2002, regulamenta sobre os limites da exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos na faixa de radiofrequências entre 9 kHz e 300 GHz (CEMRF), associados à operação de estações transmissoras de radiocomunicação de serviços de telecomunicações, definindo também métodos de avaliação quanto à exposição à RNI, ou CEMRF, e procedimentos a serem observados para o licenciamento de estações (ICNIRP, 1998). A referida resolução especifica os valores limites de intensidade de campo elétrico, magnético, densidade de potência e corrente induzida, aos quais a população pode ser exposta. São definidos valores diferenciados para as exposições pela população ocupacional e população em geral.

A exposição ocupacional refere-se àquela em que pessoas são expostas em consequência de sua atividade profissional, desde que estejam cientes do potencial de exposição e possam exercer controle sobre sua permanência no local, ou adotar medidas preventivas. Por outro lado, a exposição pela população em geral, ou exposição não

controlada, refere-se à situação em que a população em geral está exposta a CEMRF, incluindo-se também aí os casos em que a população ocupacional não está ciente da exposição, ou não há a possibilidade de se adotar medidas preventivas e de controle à exposição. Os limites considerados pela Anatel são equivalentes aos indicados nas diretrizes da ICNIRP. Esses limites podem ser visualizados nas Tabelas 1 e 2, para as populações ocupacional e geral respectivamente. Para se verificar o atendimento a esses limites, é necessário saber os níveis de RNI aos quais a população se encontra exposta em uma determinada área, para que se possa planejar e adotar medidas preventivas com o objetivo de evitar ou diminuir a ocorrência de danos à saúde humana.

Tabela 1 – Limites de exposição ocupacional a CEMRF.

Faixa de frequência	Intensidade de Campo Elétrico (E) (V/m)	Intensidade de Campo Magnético (H) (A/m)	Densidade de Potência equivalente para onda plana (W/m²)
9KHz- a 150 KHz	610	24,4	X
0,15 a 1 MHz	610	1,6/ f	X
1 MHz a 10 MHz	610/f	1,6/ f	X
10MHz a 400MHz	61	0,16	10
400MHz a 2000MHz	3 f ^{1/2}	0,008 f ^{1/2}	f/40
2GHz a 300 GHz	137	0,36	50

Fonte: (BRASIL, 2009)

Tabela .2 – Limites de exposição a CEMRF pela população geral.

Faixa de frequência	Intensidade de Campo Elétrico (E) (V/m)	Intensidade de Campo Magnético (H) (A/m)	Densidade de Potência equivalente para onda plana (W/m²)
9KHz- a 150 KHz	87	5	X
0,15 a 1 MHz	87	0.73/f	X
1 MHz a 10 MHz	87/f ^{1/2}	0.73/f	X
10MHz a 400MHz	28	0.073	2
400MHz a 2000MHz	1.375 f ^{1/2}	0.0037f ^{1/2}	f/200
2GHz a 300 GHz	61	0.16	10

Fonte: (BRASIL,2009)

2.2 MODELAMENTO DO CAMPO ELÉTRICO GERADO POR EMISSORAS DE TV

Considerando a constatação de que a maior contribuição na poluição eletromagnética na cidade do Natal decorre da radiação emitida pelas estações de TV, e que, ao contrário da radiação emitida pelas estações celulares, verifica-se uma variação considerável na intensidade decorrente das estações de TV em diferentes áreas da cidade, foi desenvolvido

O modelamento da intensidade do campo elétrico total em um ponto da área urbana foi desenvolvido a partir da equação básica da intensidade de campo elétrico total no ponto (V/m), explicitada por Rappaport (2008), onde ERP_i : potência efetivamente radiada pelo transmissor i na direção do ponto localizado a uma distância d_i . As potências ERP_i variam com o diagrama de radiação de cada antena transmissora conforme equações (1).

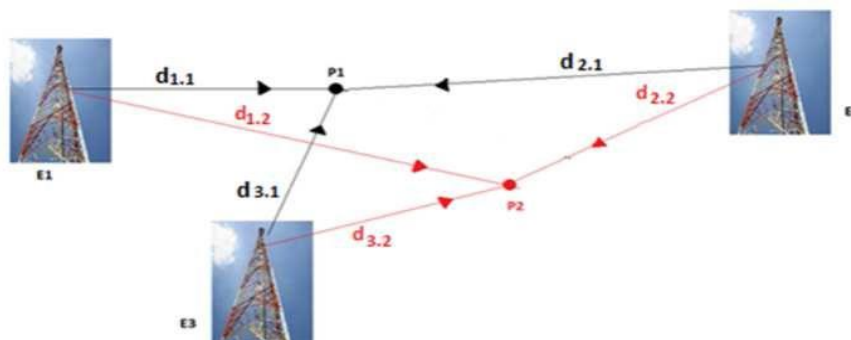
$$|E|_t = \sum_{i=1}^k \frac{5,47\sqrt{ERP_i}}{d_i^{n/2}} \quad 1)$$

Para modelamento da Intensidade do Campo Elétrico, foi utilizada a expressão geral para o campo total, considerando genericamente k transmissores de TV. Embora as informações das potências irradiadas por cada antena de TV em diversos azimutes tenham sido levantadas na ANATEL, em função de ajustes e manutenções, existe a possibilidade de que os dados não estejam rigorosamente atualizados, então optou-se por uma parametrização com maior generalização explorada em Pinheiro (2015) ilustrada na equação (2).

$$|E|_t = \beta_0 + \beta_1 d_1^{\frac{-n}{2}} + \beta_2 d_2^{\frac{-n}{2}} + \beta_3 d_3^{\frac{-n}{2}} + \beta_4 d_4^{\frac{-n}{2}} + \dots + \beta_k d_k^{\frac{-n}{2}} \quad 2)$$

Existiam 18 estações de TV aberta em Natal quando da realização do presente estudo, 13 desses transmissores estão localizados em uma área de dunas chamada Morro do Tirol, no lado leste da cidade. Os outros 5 transmissores estão distribuídos em duas áreas, também sobre dunas, no bairro de Mãe Luiza e ao lado do Parque das Dunas. Dessa forma, com os 3 agrupamentos citados, o valor de k foi considerado igual a 3 para execução do modelamento estatístico. Os coeficientes foram obtidos a partir da equação (2) conforme a aplicação da regressão multivariada, para quatro áreas distintas da cidade, definidas de acordo com os ângulos azimutes entre o Morro do Tirol e cada ponto. A Figura 2 ilustra espacialmente o modelo. Os coeficientes β_i foram obtidos a partir da equação conforme a utilização da regressão multivariada para quatro áreas distintas da cidade, definidas de acordo com os ângulos azimutes entre o Morro do Tirol e cada ponto.

Figura 2 - Ilustração do Campo Elétrico gerado por diversos transmissores e que atinge um ou mais pontos específicos.



Fonte:Elaboração de própria autoria

A divisão em áreas para análise, decorre de dois aspectos que foram considerados com o propósito obter melhor precisão de resultados: os diagramas de irradiação das antenas transmissoras de TV operando em VHF e UHF e das antenas transmissoras de TV operando em VHF e UHF, além do expoente de perda de propagação n , que depende principalmente das características do relevo do terreno e das edificações existentes. Em função destes fatores, foram definidas quatro áreas distintas para execução dos modelamentos para estimativa da Intensidade do Campo Elétrico. As áreas foram estabelecidas considerando principalmente: os lóbulos de irradiação das antenas, o grau de adensamento estabelecido pelo Plano Diretor da Cidade (SEMURB, 2007). O ponto de referência considerado para definição dessas áreas foi o local de maior concentração de Torres de TV na cidade: as dunas do Morro do Tirol. A Figura 3 apresenta visualização espacial simplificada das áreas definidas, que foram denominadas “grupos”.

Figura 3 - Áreas distintas definidas para modelamento estatístico da Intensidade do Campo Elétrico



Fonte: Elaboração pelos autores com recursos do Google Maps

As quatro áreas indicadas recebem percentuais distintos de radiação emitidas a partir do Site Morro do Tirol. A Tabela 4 indica o rateio aproximado para a distribuição de potência irradiada, considerando as informações técnicas cadastradas na ANATEL referentes aos diagramas de irradiação das antenas e potências de transmissão de RF.

Tabela 4- Delimitação das quatro áreas para aplicação dos modelamentos estatísticos

ÁREA	AZIMUTES (NV)	% DE POTÊNCIA RF IRRADIADA NA DIREÇÃO *
Grupo 1	252 a 342 graus	28
Grupo 2	342 a 72 graus	24
Grupo 3	72 a 162 graus	18
Grupo 4	162 a 252 graus	29

Fonte: Elaboração de própria autoria

Em função dos agrupamentos considerados para os transmissores distribuídos e da sua segmentação em quatro áreas de análise, a expressão matemática referencial da Intensidade do Campo Elétrico, ficou ajustada para equação, aplicável em áreas distintas, conforme a equação (3) a seguir:

$$|E|_t = \beta_0 + \beta_1 d_1^{\frac{-n}{2}} + \beta_2 d_2^{\frac{-n}{2}} + \beta_3 d_3^{\frac{-n}{2}} \quad (3)$$

A aplicação da equação para diversos pontos de uma área urbana na qual foram feitas medições resultaram em equações características de erro que relacionam os valores efetivamente medidos com os calculados com base no modelo desenvolvido, conforme explicitado em Pinheiro (2015).

A regressão multivariada processa o modelamento acima explicitado na busca dos parâmetros β_0 , β_1 , β_2 e β_3 que possibilitem o erro quadrático mínimo, cujos valores estão apresentados na Tabela 5. Esse processamento é feito a partir das derivadas parciais dos erros quadráticos. No desenvolvimento que está sendo apresentado os valores de β_i foram determinados especificamente para as quatro áreas, considerando amostras de medições da intensidade do campo elétrico gerado pelas TVs realizadas em 160 pontos da área urbana na cidade de Natal (RN). Um banco de dados foi montado a partir das coordenadas de cada ponto, da medida Intensidade de Campo Elétrico correlato e das distâncias até as torres transmissoras de TV.

A análise de qualidade do ajuste foi feita com base no coeficiente de determinação R^2 (Hair *et al.*, 2005). A avaliação crítica dos resultados levou em consideração aspectos de colinearidade estatística, sendo também foi verificado que os erros apresentavam uma distribuição próximo da Curva Normal. A Tabela 5 indica os melhores resultados obtidos por meio do Software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2015), uma linguagem de programação e um ambiente para computação estatística e gráfica. Os dados obtidos foram digitados e armazenados no programa Excel (Versão 2010) e logo após, foram exportados para o software **R** (versão 3.2.1), no qual que nele foram feitas todas as análises estatísticas gráfica e cálculos matemáticos.

Para cada área, foram testados para valores selecionados entre 2,0 e 3,9 referentes aos expoentes de atenuação de propagação, sendo escolhidos aqueles com melhor resultado de R^2 . Os expoentes de atenuação (n) que melhor representam as diferentes regiões da cidade ficaram com valores entre 2,6 e 3,8. Os valores encontrados de R^2 , entre 0,999 e 0,923, atendem plenamente a meta de convergência (HAIR *et al.*, 2005).

Tabela 5- Resumo dos resultados para os coeficientes da regressão multivariada

Área	β_0	β_1	β_2	β_3	n	R2
1	0.1771	1.4838	0.3869	0	2.6	0.998
2	0.1323	0.9714	0.5095	0.4280	3.4	0.999
3	0.0279	2.0840	0	0	3.8	0.997
4	0.179	1.7327	0.3743	0	3.0	0.923

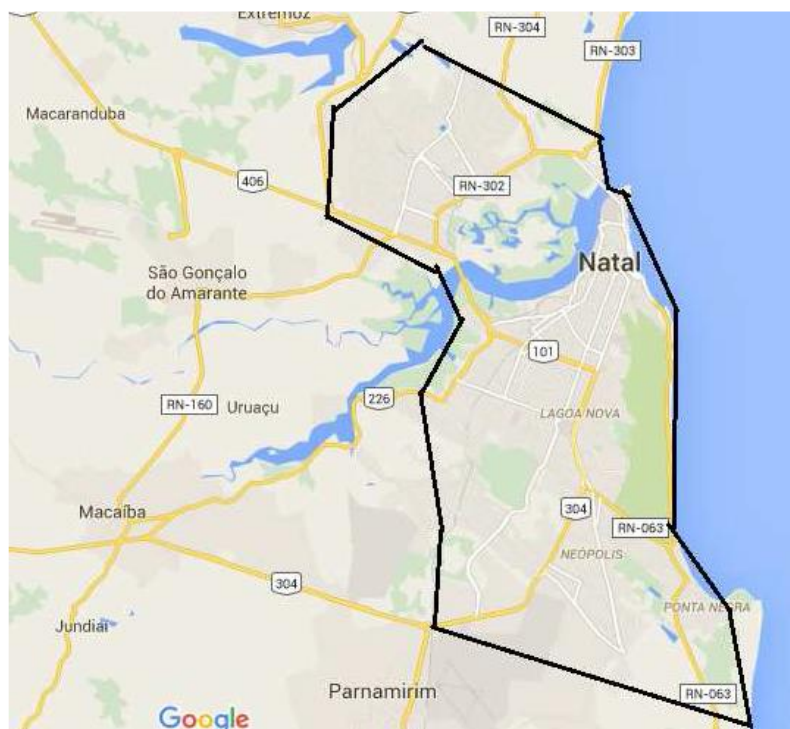
Fonte: Elaboração de própria autoria

3 MÉTODO E MEDIÇÕES

O método proposto nesta pesquisa para o modelamento está caracterizado como um estudo de caso. A metodologia aplicada contemplou a definição da área geográfica do estudo, o estabelecimento de referência para avaliação da exposição à RNIs, caracterização das formas de emissão das radiações, a identificação das fontes geradoras de radiação, a definição dos pontos de medição, os procedimentos do modelamento da predição para intensidade do campo elétrico gerados pelas estações de TV.

A área definida para estudo e avaliação da emissão de radiação não ionizante abrange predominantemente o município de Natal e pequena parte do município vizinho de Parnamirim, conforme ilustrado na Figura 4. Os bairros de Nova Parnamirim e Emaús são conurbados com Natal. No total são 167,26 km² de área urbana onde foi feita a pesquisa. A cidade do Natal pertence a Mesorregião do Leste potiguar e a Microrregião de Natal, possui uma população de 870 mil habitantes, se adicionada aos moradores da vizinha cidade de Parnamirim (242 mil habitantes, cidades conurbadas) já corresponde a um total que supera 1,1 milhão de pessoas (estimativas do IBGE para 2015).

Figura 4 - Área definida para avaliação da emissão de RNI envolve o município de Natal e parte de Parnamirim (regiões denominadas Nova Parnamirim e Emaús)



Fonte:Elaboração de própria autoriacom recursos do Google Maps

Após a definição dos limites da área urbana da Grande Natal, foco da pesquisa e da sua caracterização, foi realizada, na sequência, a identificação e a localização das principais estações fixas emissoras de radiação eletromagnética não ionizante na cidade. Além da localização de cada torre transmissora, foram especificados os serviços prestados, as faixas de frequências, as potências e tipos de emissão utilizadas.

Na Tabela 6 encontra-se detalhada a distribuição das Estações Rádio Base Celular por operadora e por tecnologia. Deve-se esclarecer que a quantidade de torres é menor que a quantidade de ERBs, pois existem muitos casos de compartilhamento de infraestrutura entre diferentes tecnologias da mesma operadora e até entre operadoras diferentes. A SEMURB (Secretaria Municipal de Planejamento Urbano e Meio Ambiente) incentiva esse compartilhamento visando minimizar a poluição visual na cidade. As ERBs celulares se distribuem por toda área de Natal, mas maior concentração ocorre na região envolvendo os bairros de Petrópolis, Tirol, Barro Vermelho, Alecrim, Lagoa Nova, Lagoa Seca, Cidade Alta e Neópolis.

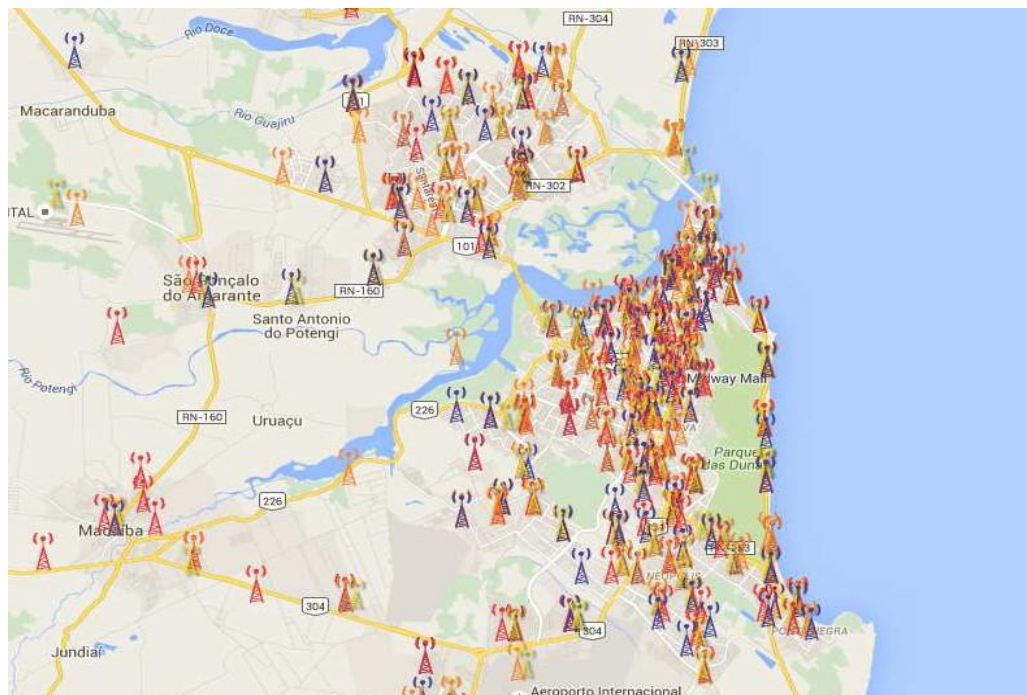
Tabela 6-Quantidade de Estações Rádio Base da Telefonia Móvel Celular por tecnologia em Natal

OPERADORA	QUANTIDADE DE ERBS POR TECNOLOGIA			
	2 G	3G	4G	TOTAL
CLARO	62	64	63	189
NEXTEL	5	18	0	23
OI	95	97	66	258
TIM	69	72	67	208
VIVO	80	80	44	204
TOTAL	311	331	240	882

Fonte:Elaboração de própria autoria

Na medida em que ocorre o afastamento de Natal na direção de Ceará Mirim ou Macaíba, observa-se uma natural redução na quantidade de torres. A Figura 5 mostra, de forma simplificada, a distribuição geográfica das ERBs dos Sistemas Celulares na região de Natal.

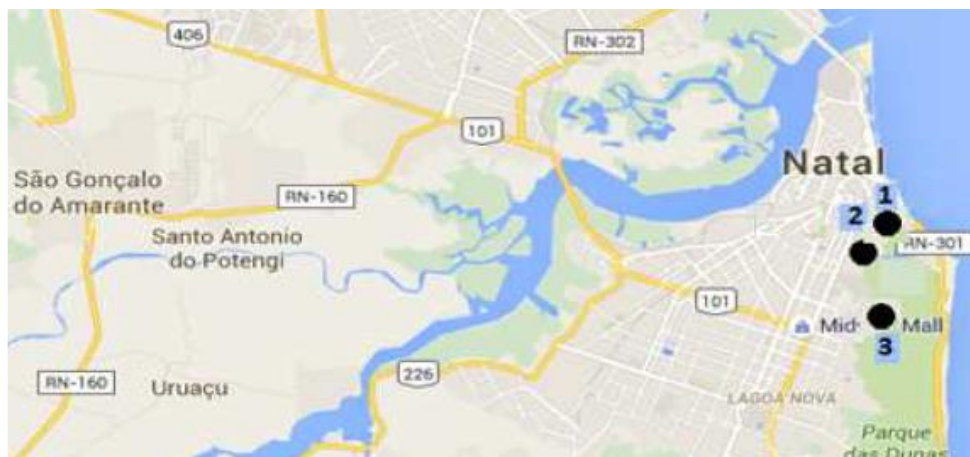
Figura 5 - Localização das ERBs de Telefonia Móvel Celular em Natal .



Fonte: Elaboração de própria autoria com recursos do Google Maps

Os transmissores das emissoras de TV abertas em Natal se concentram em quatro áreas elevadas localizadas no lado leste da cidade na região do Parque das Dunas. A Figura 6 detalha a distribuição geográfica destes transmissores: a) Morro do Tirol (Parque das Dunas), b) Dunas do Tirol (Parque das Dunas) c) Morro do Tirol. Conforme a ANATEL, os transmissores de TV em Natal operam com potência máxima efetivamente radiada, variando entre 14,87 KW e 102,63 KW, com utilização de antenas com polarização horizontal.

Figura 6-Localização dos Transmissores de TV em Natal: 1- Morro de Mãe Luíza, 2- Morro do Tirol, 3- Parque das Dunas



Fonte: Elaboração de própria autoria com recursos do Google Maps

Os transmissores das 12 Rádios FM localizadas em Natal têm potência radiada máxima variando entre 0,57 e 37,5 KW. A Figura 7 ilustra a localização da distribuição geográfica das estações dos transmissores das emissoras FM em Natal (1-Clube FM e Paraíso FM, 2-Cidade do Sol FM, 3-FM-U e FM Senado, 4-Nordeste FM, 5- FM Trampolim, Marinha FM e FM Tropical) e São Gonçalo (6-Fundação Educativa). Algumas estações compartilham áreas comuns ou vizinhas.

Figura 7- Localização dos Transmissores das Emissoras FM em Natal e São Gonçalo



Fonte: Elaboração de própria autoria com recursos do Google Maps

Neste estudo, as intensidades de campo elétrico na área urbana da cidade de Natal foram medidas com um analisador de espectro Rohde & Schwarz FSH6, conectado a uma sonda isotrópica com uma faixa de frequência de 30 a 3000 MHz. A sonda foi fixada em um tripé de madeira de 1,65m, em correspondência à altura média do brasileiro. Um GPS e um

computador notebook completaram o sistema rodando um software proprietário com acesso às medições do analisador de espectro. A sonda (ponta de prova) captou medição tri-axial em uma composição quadrática dos campos. O conjunto cabo, sem conector, de comprimento curto e antena, foi configurado no modo de rastreamento (Max Hold/RMS). A faixa de frequência adotada cobriu a maior parte dos serviços de radiodifusão (TVs e emissoras de FM), todo o serviço de telefonia móvel e Sistemas IEEE 802.11 b/g. A sonda isotrópica tem sua diretividade próxima à unidade (em escala linear), rastreando os sinais vindo de todas as direções em igualdade de condições. O analisador é controlado por software proprietário que permite ao usuário configurar os "pacotes de medição" para cada serviço e portanto, ativar a sequência completa de varredura com apenas alguns comandos. A tabela 7 resume as especificações de ajustes utilizados nas medições.

Tabela7: Configurações adotadas no analisador de espectro para os pacotes de medição a

Serviços / Parâmetros	TV	Rádio FM	Wi-Fi (2,4 GHz)	Celular 2G (GSM)	Celular 3G (UMTS)
<i>Video BW</i>	Auto	-	-	-	-
<i>Dwell time</i>	50 ms	50 ms	5000 ms	1000 ms	50 ms
<i>BW for each central frequency</i>	6 MHz	200 kHz	22 MHz	200 kHz	5 MHz

Fonte: Elaboração de própria autoria

A Figura 8 ilustra a utilização dos equipamentos na campanha de mediçãoa Figura 9 mostra os pontos de medição na área da cidade de Natal.

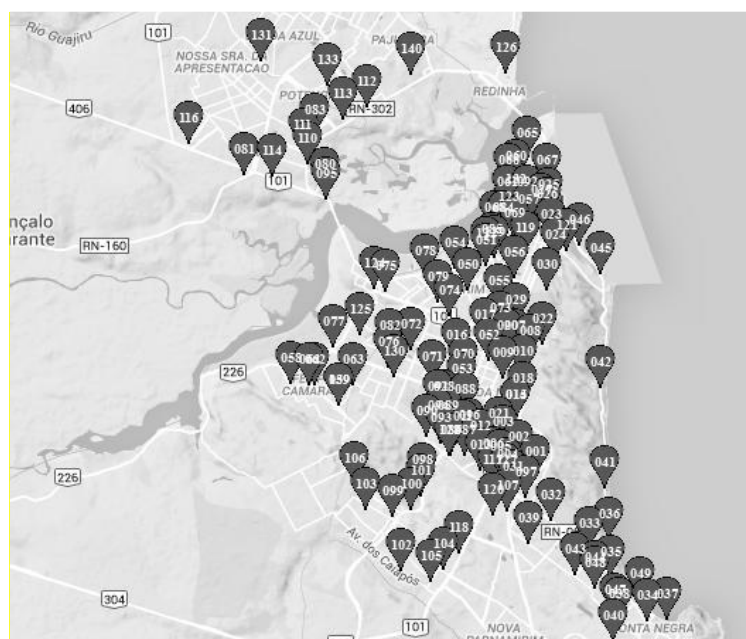
Figura 8- Equipamentos de medição próximo à praia em Natal



Fonte:Elaboração de própria autoria

As medições foram realizadas usualmente no horário de pico de tráfego da telefonia móvel para maximizar a probabilidade de obter um sinal de nível mais elevado (das 10h00 às 12h30 e das 15h00 às 19h00), na zona campo distante (Rappaport, 2018) em 160 pontos ao ar livre abrangendo todos os bairros, incluindo as principais ruas e avenidas, shoppings, escolas, creches e hospitais, definidos basicamente de acordo com os critérios de densidade populacional. Os pontos escolhidos estão a uma distância média de 320 m da base da torre mais próxima estação.

Figura 9- Pontos de medição na área urbana de Natal



Fonte: Elaboração de própria autoria com recursos do Google Maps

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na Área Urbana de Natal foram identificadas 875 estações rádio base celular (358 torres), 18 transmissores de TV, 6 Estações de radiodifusão AM e 12 FM. A maioria das estações de transmissão está localizada em lado leste da cidade. A Tabela 8 resume os resultados das medições efetuadas em 160 pontos da área urbana de Natal. Comparativamente, os maiores valores encontrados foram observados para a radiação eletromagnética emitida pelos transmissores da TV aberta. Em 77,2 % dos pontos aferidos, a intensidade do campo elétrico gerado pelas TVs superou os demais serviços pesquisados.

Tabela 8-Resumo das medidas de intensidade de Campo Elétrico

Serviço	Média (V/m)	Maiores Valores (V/m)	% dos maiores valores
TV Aberta	5.14E-01	4.18E+00	77.2
Sistema Celular (2G / 3G)	3.79E-01	4.19E+00	13.0
Rádio FM	2.15E-01	1.35E+00	9.8
WLAN (IEE 802.11bg)	1.85E-01	2.24E-01	0.0

Fonte:Elaboração de própria autoria com recursos do Google Maps

A Figura 10 mostra a intensidades total (banda larga) dos Campos elétricos em diferentes pontos. A "taxa de exposição" (ER) é um parâmetro significativo para ser analisado sendo uma relação quadrática entre o campo elétrico medido em uma frequência central específica e o limite de exposição populacional para essa frequência (Tabela 1).

Figura 10- Mapa das regiões da cidade de acordo com as regiões geográficas



Fonte: Elaboração pelos autores com recursos do Google Maps

A Razão de Exposição dada pela expressão a seguir, é o procedimento de aferição recomendado por ambos ICNIRP (1998) para situações de exposição com radiações de diferentes frequências onde os efeitos são aditivos ao corpo humano), conforme equação (4):

$$ER = \sum_i \frac{E_{m,i}^2}{E_{L,i}^2} \leq 1 \quad (4)$$

Nesta expressão, para cada canal centrado na frequência i , $E_{m,i}$ é o campo elétrico medido, enquanto $E_{L,i}$ é o limite de exposição para essa frequência de acordo com o disposto na Tabela 1. Então, no ponto de medição, a soma de todos os ER individuais (cada um calculado usando valores de campo elétrico - medidos e limite - para uma única frequência) deve ser menor ou igual que a unidade, que apresenta o ER global).

Conforme a Tabela 9, o resultado médio global da Razão de Exposição para os 160 pontos medidos (4.43×10^{-3}), decorrente das radiações emitidas pelos 4 tipos de serviços pesquisados, indica uma situação $ER < 1$, bastante confortável em relação aos limites

definidos pela ANATEL e ICNIRP. Apesar do resultado médio tranquilizador, deve ser levado em conta, entretanto, que os valores máximos de exposição, localizados no bairro do Tirol, chegam a ter variações de até 177 entre os valores medidos.

Apesar dessas diferenças, em nenhuma situação medida ocorreu superação ao limite de exposição estabelecido para o público em geral. A radiação eletromagnética gerada pelos transmissores de TV contribui com quase a metade do total da exposição eletromagnética (48,48 %) na cidade, sendo também responsável pontualmente pela maioria dos valores de pico (máximos) medidos. Avaliando os dados apresentados na Tabela 9, observa-se que, a ordem de participação na poluição eletromagnética da cidade se estabelece na sequência: TV aberta, ERBs Celulares, Rádios FMe Sistemas IEEE 802.11 (WiFi).

Tabela 9- Resultados da Razão de Exposição (ER) por serviço em Natal

Serviço	Média considerando todos os pontos	Maiores Valores (ER)	% ER (Participação Média por Serviço)
TV Broadcast	2.15E-03	5.27E-02(P22)	48.48
Sistema Celular	1.56E-03	1.27E-03(P136)	35.10
FM Broadcast	7.18E-04	5.12E-03(P 151)	16.18
WLAN (IE 802.11bg)	1,07E-05	1.25E-05 (P138)	0.24
TOTAL	4.43E-03	7.67E-02	100

Fonte:Elaboração de própria autoria

A despeito da existência de cerca de 340 de Estações Rádio Base espalhadas pela área urbana, a Telefonia Móvel não é a principal fonte de radiação eletromagnética não ionizante radiação em Natal. A radiação da transmissão TV tem contribuição mais relevante, entre as demais, na maior parte da cidade. Isto decorre pelo fato de que a tecnologia adotada nos transmissores das ERBs celulares é bem mais moderna, na qual cada transmissor é ligado nos instantes em que efetivamente está transmitindo informações. Por outro lado, os transmissores de TV e de Rádios FM tem transmissões contínuas, ininterruptas, mantendo sempre presente o sinal no ar. Além disso, as potências dos transmissores de TV são bem mais elevadas, alcançando valores de radiação emitida no ar entre 14,87 KW e 102,63 KW. A maioria das ERBs celulares opera individualmente entre 10W e 40 W (TELECO, 2017).

Considerando comparações com resultados existentes na literatura, os níveis de radiação não ionizantes medidos na Grécia foram também significativamente abaixo dos níveis de segurança de referência. Especificamente, 90% das estações avaliadas apresentaram medições de valores de campo elétrico abaixo de 3V/m (Gotsiset *al.*, 20015). Medições realizadas em SakaryaMaltepe na Turquia, resultaram na maior leitura da

intensidade de campo elétrico devido a serviços de rádio FM, sendo a medida de 2,19 V/m o valor mais alto obtido (TESNELI *et al.*, 2011). Pesquisas realizadas por Lunca et al; (2014), relatam medidas de LTE 1800 e LTE 2600 feitas na cidade de Iasi, na Romênia. De acordo com as medidas realizadas para este levantamento, os valores obtidos para o campo Elétrico variaram, de 0,008 V/m até o máximo 3,5 V / m, o que representa menos de 5,5% do limite de exposição. Em uma situação prática de exposição, os efeitos de diferentes frequências de RNI, (FM, TV, WIFI e celular), irradiadas simultaneamente, são aditivos. Usando a Equação da Razão de Exposição explicitada acima, o ER total para todos os pontos das medidas na nossa pesquisa é 0,38, portanto abaixo da unidade.

5 CONCLUSÕES

O estudo apresentou diversos aspectos de contribuição para o estudo e avaliação da emissão de RNI, focalizando a predição, a medição e a análise dos seus níveis em Natal. Merece destaque o desenvolvimento de um procedimento de avaliação da poluição eletromagnética na área urbana, que considera simultaneamente, uma composição das principais fontes emissoras de RNI, produzindo um inédito mapeamento da Intensidade do Campo Elétrico e da Razão de exposição à RNI em toda extensão territorial na cidade do Natal, de modo a permitir uma avaliação da influência comparativa dos diversos serviços de telecomunicações sem fio na área pesquisada. A pesquisa produziu também um modelamento utilizando a técnica de regressão múltipla variada para definir equações cujos resultados permitem o cálculo do campo gerado pela totalidade dos Transmissores de TV em qualquer ponto da cidade, com um comparativo das RNI emitidas na cidade com os limites de exposição oficialmente estabelecidos.

Os níveis de RNI medidos na cidade de Natal estão abaixo dos níveis da referência de segurança estabelecidos na legislação. A radiação eletromagnética gerada pelos transmissores de TV representou quase a metade do total da exposição eletromagnética (48,48 %) na cidade, sendo também responsável, pontualmente, pela maioria dos valores de pico (máximos). Os serviços de TV aberta dominam a composição do ER mesmo para alguns pontos mais próximos das torres de telefonia móvel. Isto decorre do fato de que a tecnologia adotada nos transmissores das ERBs celulares é bem mais moderna, de modo que cada transmissor é ligado somente nos instantes em que efetivamente está transmitindo informações. Por outro lado, os transmissores de TV e de Rádios FM tem transmissões contínuas, ininterruptas, mantendo sempre presente o sinal no ar.

Este resultado está em sintonia com estudos que corroboram que as transmissões de telefonia celular são consideradas como instalações de baixa potência quando comparadas com TV de transmissão (NWORGU *et al.*, 2010). Apesar da predominância mais relevante dos sinais de TV, observa-se, em diversos pontos da cidade, alteração desse quadro geral com picos de radiação também para ERBs celulares ou para Rádios FM's. O serviço WLAN (IE 802.11bg) medido em ambientes externos (áreas abertas) sempre se apresenta com níveis de radiação bem abaixo dos demais serviços pesquisados.

Os resultados desta pesquisa além de servirem de subsídio para o prosseguimento de outros trabalhos científicos decorrentes, poderão ter uma importante função de esclarecimento para a população residente em relação a poluição eletromagnética na cidade e um recurso fundamental para os órgãos de Controle Ambiental, fornecendo embasamento para a execução de ajustes racionais nos procedimentos de fiscalização e protocolos para autorização de instalação de novas torres de telecomunicações, incluindo sua aplicação, com adaptações, em outras cidades.

Como dificuldades do presente trabalho, destacamos a lentidão na execução da campanha de medições da intensidade das radiações por toda cidade, elevando o tempo médio para execução das medições bem acima do esperado. Como trabalhos futuros, consideramos oportuno a realização de novas pesquisas para contemplar aspectos aqui ainda não tratados, como a radiação acima de 2,5 GHz nos sistemas celulares 4G e a extensão das medidas para ambientes "indoor", edificações situadas próximas às torres, shopping centers e interior de veículos. Em decorrência da experiência do processo de medição em campo, recomendamos que as novas campanhas de medição contemplem pontos mais próximos e mais alinhados horizontalmente em azimuth e elevação, com as antenas das estações base. Outro aspecto que também pode ser pesquisado é a radiação denominada "uplink" transmitida pelos aparelhos celulares e dispositivos similares, na direção das Estações Rádio Base.

REFERÊNCIAS

ANTEL, Regulamento sobre limitação da exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos na faixa de radiofrequências entre 9 kHz e 300GHz. Anexo Resolução nº 303. Brasil. 2002.

ANGUERA, M.D.G, Exposição à radiação não ionizante emitida por equipamentos terapêuticos

[Internet]. Universidade de São Paulo; 2012. Available from :<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/5/5137/tde-14012013-115721/pt-br.php>. 2012.

BRAZIL, Brazilian Law n° 11.934. site visited on 2014 Mar. 29. Available from: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2009/Lei/L11934.htm. 2009.

ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). Health Phys. 74(4):494-522. 1998.

COST, Biomedical Effects of Electromagnetic Fields. 2000.

DECLARAÇÃO DO RIO 92, Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento [Internet]. Declaração Rio 92. 1992 [cited 2015 Sep 23]. Available from: <http://www.onu.org.br/rio20/img/2012/01/rio92.pdf>. 1992.

FEYCHTING M, AHLBOM A, KHEIFETS L, EMF and health. Annu. Rev. Public Health 26:165-89. 2005.

GIOVANI B., Cálculo de taxa de absorção específica e aumento de temperatura em modelos de cabeça de adulto e criança [Internet]. Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2006. Available from: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/8934/000591197.pdf?sequence=1>

GOTSIS A., PAPALIKOLAU N., KOMNAKOS D., YALOFAS A., CONSTANTINOU P., Non Ionizing Electromagnetic Radiation monitoring in Greece. Available from: <http://ikaros.teipir.gr/era/era2/A2/A21.pdf>. International. 2005

HAIR J.F., ANDERSON R.E., TATHAM R..L, BLACK W.C., Análise multivariada de dados. São Paulo: Bookman; 2005.

HUBER R., GRAF T., COLE K.A., WITTMANN I., GALLMAN E., MATTER D., SCHUDERER J., KUSTER N., BORBELY A.A., ACHERMANN P., Exposure to pulsed high frequency electromagnetic fields during waking affects human sleep. *Neuroreport*. 2000;11:3321-5. 2000.

LIN JC, BERNARDI P., Computational Methods for Predicting Field Intensity and Temperature Change. In: Barnes FS., Greenebaum B, editors. *Bioengineering and Biophysical Aspects of Electromagnetic Fields*. CRC Press; 2006.

LAMPARELLI C.C., ALESSIO F. A, HERNADEZJ.G., Radiações de Microondas e Radiofrequência: Efeitos Biológicos Rev. CETESB de Tecnologia. 1998.

NWORGU O.D., ANYAEJI C.A , OSAHON, O.D. SEKEGO E., Measurement of radio frequency radiation (RFR) power levels from some GSM base stations. *Journal of the Nigerian Association of Mathematical Physics*. 17: 469–474. 2010.

PINHEIRO F., Emissão de Radiação Eletromagnética Não Ionizante na Cidade do Natal: Caracterização, Avaliação e Modelamento com Base na Intensidade do Campo Elétrico e na Taxa de Exposição. Tese de Doutorado. PPg.CS. CCS.UFRN. 2015.

PÉREZ-VEGA C., ZAMANILLO J.M., Measurements of Non-Ionizing Radiation Levels in an Urban Environment. University of Cantabria, Communications Engineering Department (DICOM), Santander, Spain. 2005.

QUELET-HELLSTOM R., STEWART W.F., Miscarriages among female physical theapists who report using radio and microwave frequency electromagnetic radiation. *Am J Epidemiol.*; 138: 775: 86. 1993.

RAPPAPORT T.S., Comunicações sem fio, princípios e prática. 2nd ed. Prentice Hall. 2008.

SALLES A., FERNANDEZ C.R, BONADIMAN M., FDTD simulations and measurements on planar antennas. *Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC). Proceedings of the for mobile phones 2003 SBMO/IEEE MTT-S International*. 2:1043-1048. 2003.

SALLES A., Efeitos Biológicos dos Campos Eletromagnéticos. In: Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo CBMag 2000, 2000, Natal, RN.. Anais do IV Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo- CBMag 2000. Natal: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2000. v. 1. p. 5-9. 2000.

TESNELI A.Y., TESNELI N.B., KANBEROGLU B., Measurements of Electromagnetic Radiation in an urban environment. 2011.

AvailableFrom:<http://memberfiles.freewebs.com/14/16/50451614/documents/MEASUREMENTS%20OF%20ELECTROMAGNETIC%20RADIATION.pdf>

R DEVELOPMENT CORE TEAM, R: *A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria, Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>, 2015.

REISER H., DIMPFEL W., SCHÖBER F., The influence of electromagnetic fields on brain activity .Eur J Med Res. 1995;1:27-32. 1995.

TELECO, Newsletters [Internet]. Available from <http://www.teleco.com.br/ncel.asp>. 2017.
SEMURB, Prefeitura Municipal. Plano Diretor da Cidade do Natal. 2007.